

Поведение пор в металле на начальном этапе прессования

Ю.Н. Логинов, К. В. Еремеева

*ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет – УПИ»,
г.Екатеринбург*

Актуальность проблемы и постановка задачи

Прессование после выполненной стадии распрессовки принято считать стационарным процессом обработки металлов давлением. В то же время выходной конец отпрессованного пресс-изделия обычно отрезают с целью удаления металла, не прошедшего через очаг деформации в стационарной стадии и поэтому не получившего необходимого уровня нагартовки. Традиционно считается, что минимальная длина такой обрезки составляет величину около двух диаметров. На этой длине структура металла остается не проработанной, и поэтому свойства металла остаются низкими.

Одна из целей прессования – не только измельчить структуру металла через процесс динамической рекристаллизации, но и избавиться от унаследованной от литья остаточной пористости. Если для первого процесса необходимо сообщить металлу определенную степень сдвиговой деформации, то для второго процесса необходимо повысить плотность металла за счет сообщения ему определенной степени объемной деформации. Необходимо изучить условия, при которых процесс уплотнения материала произойдет полностью. Здесь не будет обсуждаться вопрос, какую роль будут играть закрытые поры в дальнейшей обработке металла (например, участвовать в формировании расслойных трещин или других дефектов).

Возможно два подхода к решению такой задачи. Один из подходов связан с наделением свойства сжимаемости всего прессуемого материала [1-3]. Его логично применить, если остаточная пористость рассредоточена по всему объему слитка. Однако во многих случаях пористость локализована в центре литой заготовки. Это объясняется тем, что при отливке металл кристаллизуется по направлению от периферии слитка к его оси. Так как плотность расплава меньше плотности твердого металла, то его не хватает для заполнения середины слитка и образуется усадочная раковина, либо в виде полости, либо в виде отдельных пор. В этом случае целесообразно рассматривать такой дефект как сосредоточенный в центре заготовки, т.е. пору, например, круглого сечения. Такой же подход может быть применен для анализа поведения при прессовании дефектов слитков типа центральных трещин, природа которых описана в книге [4].

Методика решения

На рис.1 изображена схема рассматриваемого процесса. Пуансон, совмещенный с пресс-шайбой 1, воздействует на заготовку 2, расположенную в контейнере 3 пресса. Деформируемый металл, имеющий поры 4, вытекает из отверстия матрицы 5 с образованием прутка круглого поперечного сечения. После деформации поры изменяют свою форму вплоть до полного исчезновения за счет сжатия и схлопывания их стенок.

Процесс прессования прутка с порами моделировали с помощью программного комплекса РАПИД-2D [5], разработанного сотрудниками Уральского государственного технического университета – УПИ и предназначенного, в основном, для математического моделирования процессов горячейковки и штамповки. Расчет основан на применении метода конечных элементов. Программный комплекс удалось применить для описания некоторых частных случаев прессования [6,7].

В данном случае интерес представляет моделирование процесса прессования с малыми коэффициентами вытяжек, поскольку именно в этом случае длина пресс-изделия

получается небольшой, а передняя, плохо продеформированная часть изделия составляет ощутимый объем металла, предназначенный для отбраковки.

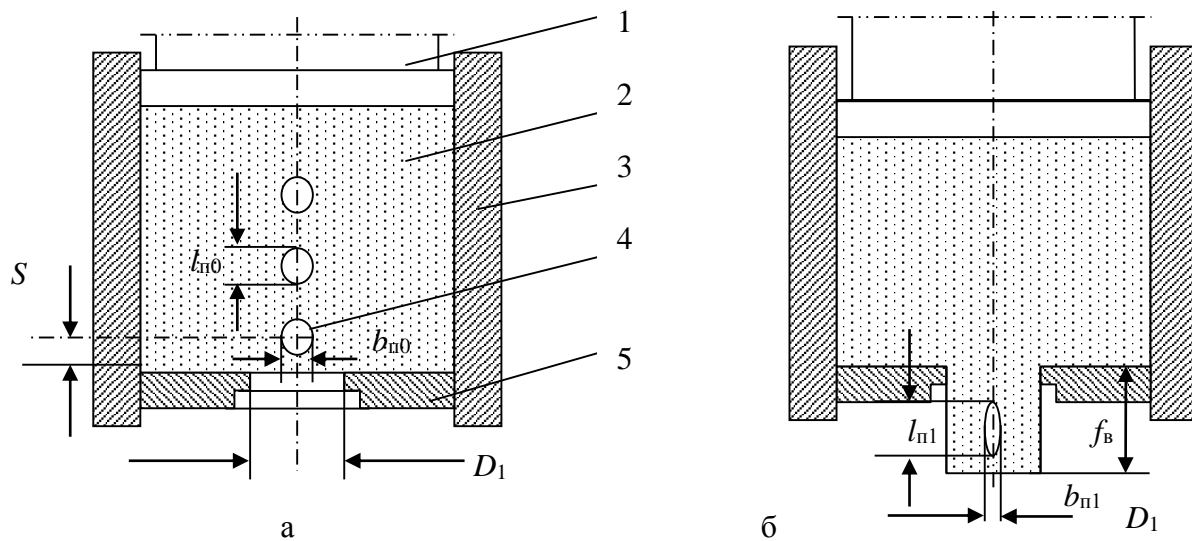


Рис.1. Схема прессования круглого прутка с расположенными по его оси порами: а – до прессования; б – после выдавливания части прутка на длину $l_{п1}$; 1 – пуансон; 2 – деформируемый металл; 3 – контейнер; 4 – пора; 5 – матрица

Опишем изменение формы и объема поры в категориях механики деформируемой среды. Обозначим начальные размеры поры в направлении длины заготовки, радиуса и в тангенциальном направлении как $l_{п0}$, $b_{п0}$, $c_{п0}$, (при этом в начальный момент времени для круглой поры $l_{п0} = b_{п0} = c_{п0} = D_{п}$), а конечные размеры как $l_{п1}$, $b_{п1}$, $c_{п1}$. Тогда деформации в этих направлениях можно оценить как

$$\varepsilon_{пz} = \ln(l_{п1}/l_{п0}), \varepsilon_{пr} = \ln(b_{п1}/b_{п0}), \varepsilon_{п\phi} = \ln(c_{п1}/c_{п0}). \quad (1)$$

Степень объемной деформации поры может быть определена как сумма этих величин:

$$\varepsilon_{п} = \varepsilon_{пz} + \varepsilon_{пr} + \varepsilon_{п\phi}. \quad (2)$$

Для осесимметричной деформации можно также применить правило равенства двух компонент тензора деформаций: $\varepsilon_{пr} = \varepsilon_{п\phi}$.

Допустим, что при сжатии сферической поры вдоль определенной оси она претерпевает только изменение формы без изменения объема. Тогда длина окружности сечения поры, равная первоначально $\pi D_{п}$, становится равной половине протяженности линейного дефекта. Определим максимально возможную длину такого дефекта: $l_{пmax} = 0,5\pi D_{п}$, отсюда линейная деформация поры вдоль оси удлинения равна

$$\varepsilon_{пz \max} = \ln(0,5l_{пmax}/D_{п}) = \ln(0,5\pi) = 0,45. \quad (3)$$

Такие значения этого параметра могут быть получены при отсутствии в деформируемом материале напряжений сжатия вдоль оси удлинения. Более сложная ситуация возникает при полном схлопывании поры по ее поперечному размеру. Действительно, при уменьшении ширины поры $b_{п1}$ до нуля получим:

$$\varepsilon_{\text{pr min}} = \ln(b_{\text{pl}}/D_{\text{pl}}) = \ln(0) = -\infty. \quad (4)$$

Исходная постановка задачи включала размещение заготовки диаметром D_c в контейнере такого же диаметра (без распрессовки) при установке матрицы с отверстием диаметр D_1 . Две поры диаметром $D_{п} = 0,06D_c$ размещали по оси заготовки на различном расстоянии S от ее переднего торца: $0,2D_1$ и $0,4D_1$.

Решение задачи для малого коэффициента вытяжки

На рис.2 представлено решение задачи при выдавливании прутка на длину $f_b = 0,4D_1$ для случая прессования заготовки при коэффициенте вытяжки $\lambda = 2$. Такие малые коэффициенты вытяжки редко применяются в технологии прессования из-за опасности непроработки структуры не только в начальной стадии процесса, но и в установившейся стадии. Однако этот вариант расчета позволяет сравнить результаты с другими, большими обжатиями. В этом варианте решения показатель трения на всех рабочих поверхностях инструмента назначали равным величине 0,4, что эквивалентно случаю прессования с умеренным трением и налипанием.

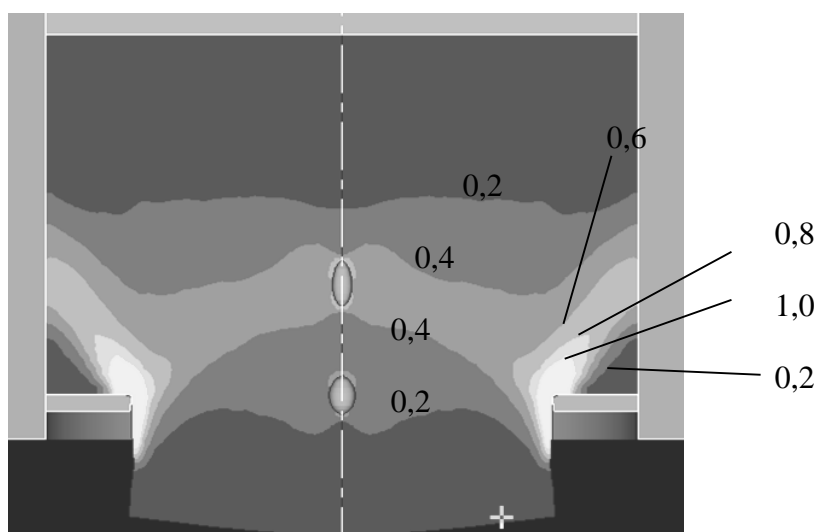


Рис.2. Линии равного уровня степени деформации сдвига и форма пор в начальной стадии процесса прессования при коэффициенте вытяжки 2

При коэффициенте вытяжки 2 степень деформации сдвига Λ составляет величину 1,2. В стационарной стадии процесса эта величина должна наблюдаться на оси заготовки, где деформация осуществляется только за счет удлинения. В периферийных слоях значения Λ должны быть выше из-за наличия дополнительной сдвиговой деформации. Как видно из рисунка, на самом деле уровень деформаций по оси заготовки в начальной стадии процесса оказывается гораздо ниже и колеблется в диапазоне $0 \dots 0,4$, что не противоречит известным данным для описания начальной стадии прессования [8]. Степень деформации сдвига приобретает большие значения только вблизи калибрующего пояса матрицы.

Расчеты показали, что непосредственно за порой, проходящей очаг деформации, следует область действия растягивающих напряжений, вообще говоря, их наличие не является характерным признаком метода прессования. В некоторых случаях в этой области могут

действовать и сжимающие напряжения, но их уровень окажется заведомо меньше, чем в некотором отдалении от поры. Поэтому наличие поры создает неблагоприятный уровень напряженного состояния, вызывает снижение пластичности и может создавать условия для появления других, теперь уже вторичных дефектов: внутренних разрывов, трещин.

В дальнейшем изменяли параметры f_b/D_1 и S/D_1 каждый на двух уровнях, как это показано в таблице, и определяли показатели формоизменения поры.

Таблица

Показатели процесса прессования и формоизменения поры при коэффициенте вытяжки 2

f_b/D_1	S/D_1	$\varepsilon_{пз}$	$\varepsilon_{пр}$	$\varepsilon_{п}$	$-\varepsilon_{пр}/\varepsilon_{пз}$
0,3	0,2	0,14	-0,32	-0,50	2,3
0,3	0,4	0,20	-0,52	-0,84	2,6
1,0	0,2	0,21	-0,45	-0,69	2,1
1,0	0,4	0,28	-3,7	-7,12	13,2

Как видно из таблицы, наименьшее изменение объема поры произошло при $f_b/D_1 = 0,3$ и $S/D_1 = 0,2$, т.е. для случая, когда пора размещена наиболее близко к переднему торцу заготовки. Это объясняется тем, что эта пора попадает в малодеформируемую часть очага деформации. Наибольшее изменение объема поры произошло при $f_b/D_1 = 1,0$ и $S/D_1 = 0,4$, т.е. при расположении поры на удалении от торца заготовки и полном выдавливании этой части заготовки из очага деформации.

Кроме того, имеющиеся показатели демонстрируют характер изменения формы поры, для чего в таблице рассчитано отношение $-\varepsilon_{пр}/\varepsilon_{пз}$. Наименьшие значения этого показателя 2,1...2,3 характеризуют поры, размещенные близко к торцу заготовки, т.е. эти поры сохраняют после прессования достаточно округлую форму. Пора, размещенная на удалении от торца, ощутимо вытягивается в направлении прессования и имеет тенденцию к схлапыванию.

Вблизи пор создаются возмущения в характере распределения степени деформации сдвига, что видно по искажению линий равного уровня.

Решение задачи при варьировании контактного трения

В реальном производстве коэффициенты вытяжек при прессовании назначаются выше, чем это сделано в предыдущем решении. Поэтому на следующем этапе исследования назначили коэффициент вытяжки $\lambda = 4$, что соответствует степени деформации сдвига Λ на оси заготовки 2,4.

При этом назначили два граничных показателя трения: $\psi = 0$ и $\psi = 1$, результаты этого решения приведены на рис.3. Здесь же для сравнения показаны изменения координатных сеток. Прессование при отсутствии трения приводит к формированию «низкого» очага деформации с границами, очертания которых могут быть приближенно описаны радиальными поверхностями (рис.3, а). Такой прием часто используется в теории прессования для фиксирования формы очага деформации. В противоположность этому очаг деформации при развитом трении (рис.3, б) мало похож на предыдущий вариант, его границы распространяются на всю длину заготовки, протяженность жестких зон у матрицы оказывается очень большой. Эти факты известны из теории и практики прессования [8], поэтому важно оценить их влияние на процесс деформации пор.

В отличие от предыдущего варианта прессования, в этом варианте при увеличении коэффициента вытяжки вторая по ходу прессования пора закрывается полностью при любом показателе трения. О бывшем существовании этой поры на схеме говорит сгущение линий координатной в центре заготовки и область возмущения степени деформации сдвига. Первая по ходу прессования пора имеет различную форму: при отсутствии трения она сильно вытянута вдоль оси прессования, а большом трении форма поры более округлая. И в том и в

другом случае пора попадает в область проработки металла со степенью деформации сдвига $\Lambda = 0,8$, однако во втором случае из-за большого трения на стенках контейнера снижен уровень радиальных напряжений, действующих на пору. Обращает на себя внимание тот факт, что до достижения минимальной степени деформации сдвига $\Lambda = 2,4$ на оси заготовки, т.е. для выхода в стационарную стадию процесса, необходимо продолжать выдавливать металл на значительную длину.

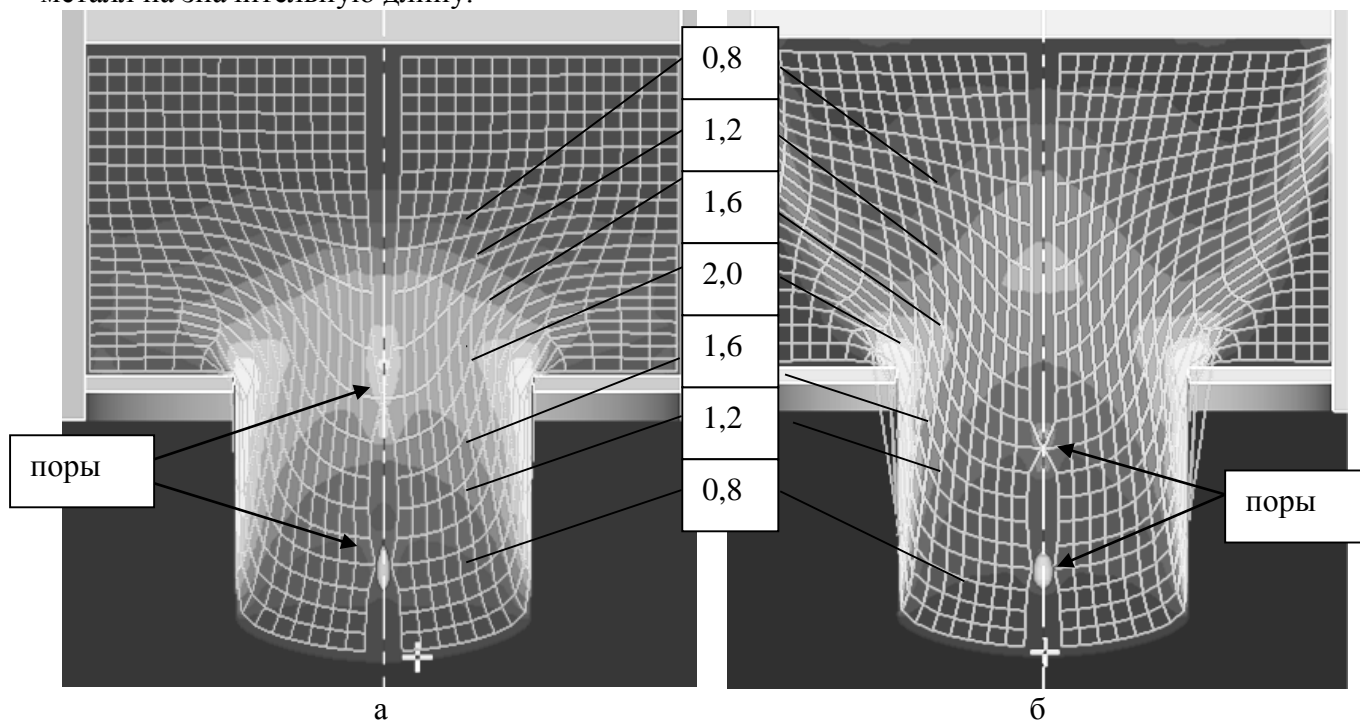


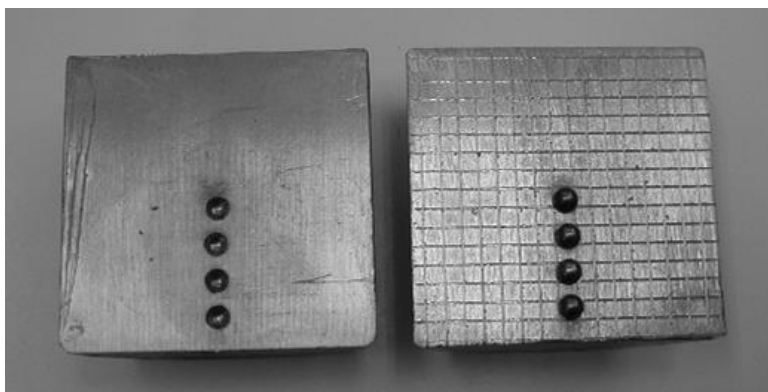
Рис.3. Очаг деформации, координатная сетка, форма пор и линии равного уровня степени деформации сдвига Λ (значения – числа в таблице) при прессовании с коэффициентом вытяжки 4 и показателем трения по Зибелю $\psi = 0$ (а) и $\psi = 1$ (б)

В целом, решение задачи показало, что ликвидация пор в выходном конце заготовки при прессовании происходит быстрее, чем достигается стационарная стадия прессования. Кроме того, устранение пор, расположенных в центре заготовки, происходит не за счет уменьшения их объема и превращения в точечные дефекты, имеющие минимальные размеры, а за счет вытягивания в направлении прессования. В результате создаются дефекты, имеющие определенную длину.

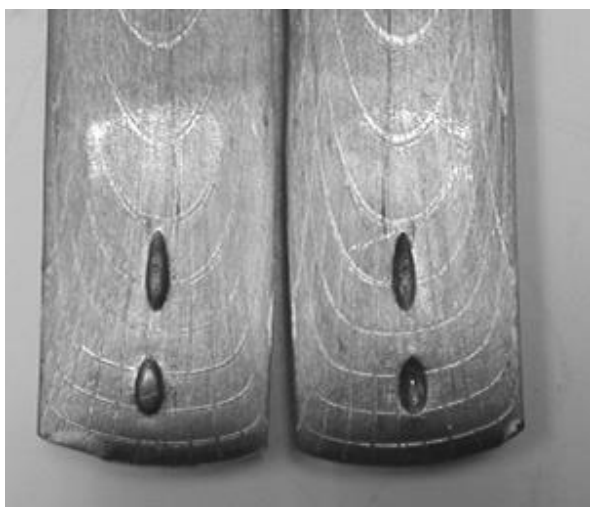
При использовании больших коэффициентов вытяжек (они при прессовании могут достигать значений 1000 и более) следует ожидать наличия больших напряжений сжатия, что приведет к более раннему закрытию пор, однако дефект от такого схлапывания все равно будет иметь место.

Экспериментальная часть

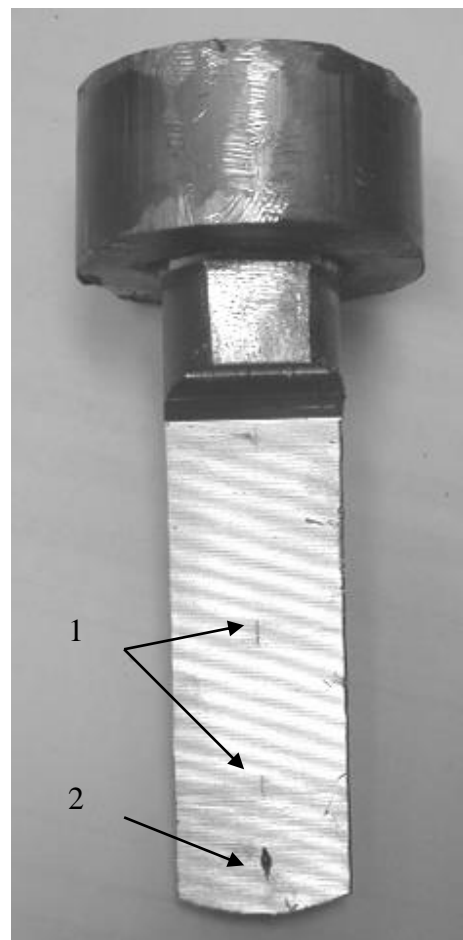
Экспериментальную проверку теоретического описания процесса выполнили с использованием в качестве модельного материала технического свинца. Свинец отливали в слитки диаметром 78 мм, для устранения анизотропии литого металла из них на гидравлическом прессе прессовали заготовки диаметром 44,5 мм, прутки разрезали на мерные длины и осаживали в контейнере диаметром 50 мм до заполнения полости контейнера. На токарном станке выполняли торцевание заготовок для выравнивания длин и получали заготовки диаметром 49,8 мм.



а



б



в

Рис.4. Форма образцов до и после прессования с коэффициентом вытяжки 4: а - образцы с координатной сеткой и порами до прессования по первому варианту опытов; б - изменение координатной сетки и формы пор вдоль длины передней части отпрессованного прутка по второму варианту опытов, в – заготовка с пресс-остатком, частично простроганная в диаметральной плоскости по третьему варианту опытов с полным закрытием пор 1 и незакрытой порой 2

В первом варианте опытов полученные калиброванные заготовки прострагивали на строгальном станке до получения диаметральной плоскости. Для отслеживания локальных деформаций на диаметральную плоскость одного из образцов наносили координатную сетку с шагом 3 мм. На плоскости изготавливали отверстия в форме половины сферы, для чего засверливали углубления, в которые для калибрования размера вдавливали шарик диаметром 4 мм (рис.4, а). На ответной половине изготавливали такие же отверстия. Две заготовки соединяли по диаметральным плоскостям, помещали в контейнер диаметром полости 50 мм и прессовали через матрицу диаметром 25 мм при коэффициенте вытяжки 4.

Последующая практика прессования показала, что пластическое течение двух половин заготовки даже при их скреплении происходит неравномерно, поэтому половины сфер, которые должны образовывать пору, расстыковываются со взаимным заполнением полостей, что затрудняет последующий анализ ситуации.

Во втором варианте опытов засверливали углубления в одной половине заготовки, в которые для калибрования размера вдавливали шарик диаметром 4 мм, но в ответной половине такие углубления не выполняли, что позволяло не добиваться совмещения отверстий в этих двух половинах. На рис.4, б приведены результаты такого опыта в виде двух половин отпрессованной заготовки, правая из которых содержит отверстия, а левая

является ответной частью. На фото линии координатной сетки имеют форму парабол с ветвями, направленными против направления прессования.

Недостаток этого опыта заключается во вдавливании металла левой ответной части в отверстия правой части, что искажает общую картину деформации, поскольку полость поры в этом случае не будет заполнена ни при каких обстоятельствах, поскольку этому мешает уже вдавленный в пору металл. Как видно из фото, характер линий координатной сетки не претерпевает изменений при приближении к поре, что говорит о слабом влиянии поры на общий характер течения металла в этом опыте, что также объясняется тем, что деформации подвергается заготовка с порами, частично или полностью заполненными металлом.

Положительной чертой этого варианта явилась возможность оценить изменение формы пор по ходу прессования: она изменяется от более округлой до более вытянутой. Этот результат качественно подтверждает картину деформации, полученную в решении задачи методом конечных элементов.

Для устранения недостатков первого и второго вариантов опыта было принято решение имитировать поры сквозными полостями - сверлениями, выполненными поперек оси заготовки без разделения ее на две половины. Это позволяло не добиваться совмещения отверстий в этих двух половинах и не приводило к преждевременному перетеканию металла в поры, однако здесь не удавалось отследить деформации с помощью координатной сетки. После прессования изготавливали продольный темплет заготовки строжкой на строгальном станке с расположением плоскости темплета перпендикулярно осям полостей. В этом третьем варианте опытов установлено, что первая по ходу прессования пора частично сохраняет свой объем (рис.4, в), а следующие за ней поры закрываются полностью, что выглядит на фотографии как трещины или волосовины. Именно этот результат был получен при решении задачи методом конечных элементов, таким образом, результаты компьютерного моделирования в опытах подтвердились. Кроме того, установлено, что поры, удаленные от торца заготовки, превращаются в дефекты типа расслоений, вытянутых вдоль оси прессования.

Выводы. Результаты компьютерного моделирования и экспериментов выявили различие в поведении пор, расположенных по центру заготовки при прессовании на различном расстоянии от торца этой заготовки. Поры, приближенные к выходному концу пресс-изделия, приобретают веретенообразную форму, следующие за ними поры могут схлопываться с образованием дефектов, имеющих определенную протяженность вдоль оси заготовки. Повышенное трение на инструменте способствует сохранению первоначальной формы пор. Наличие пор создает неблагоприятный уровень напряженного состояния, вызывает снижение пластичности и может создавать условия для появления других, теперь уже вторичных дефектов: внутренних разрывов, трещин.